

МЕТЕОРИТЫ КАК СВИДЕТЕЛИ И ПРОДУКТЫ ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, УГРОЗА И РЕСУРС НА БУДУЩЕЕ

Б. М. Шустов

Институт астрономии Российской академии наук

В этой вводной лекции затрагиваются представления о происхождении метеоритов как производных эволюции астероидов и комет (основная тема), а также угроза, связанная с метеоритами, астероидами и кометами, и тема метеоритов, астероидов и комет как космических ресурсов.

METEORITES AS WITNESSES AND PRODUCTS OF THE EVOLUTION OF THE SOLAR SYSTEM, THREAT AND RESOURCE FOR THE FUTURE

B. M. Shustov

Institute of Astronomy RAS

The introductory lecture addresses understanding of the origin of meteorites as product of evolution of asteroids and comets (major topic); the threats associated with meteorites, asteroids and comets and meteorites, asteroids and comets as cosmic resources.

Введение

Современные мощные наблюдательные средства (например, радиоинтерферометр ALMA, Космический телескоп Хаббл) дали мощный толчок к развитию представлений об образовании планетных систем. Такие данные позволяют проверять и уточнять многие важные элементы наших космогонических теорий (хотя, как это и типично для науки, при этом появляются новые вопросы). В последние годы развитие космической техники позволило изучать планеты, астероиды, кометы нашей Солнечной системы что называется *in situ*. Но все-таки наиболее доступным средством изучения вещества твердых тел нашей Солнечной системы (кроме Земли и, в некоторой степени, Луны и Марса) остаются метеориты. Метеориты хранят следы

сложнейшего комплекса процессов, определявших образование Солнечной системы и ее эволюцию от стадии формирования первичных сгустков газо-пылевого вещества до современного состояния.

В первой части этой лекции описаны основные свойства метеоритов и обсуждается, как они согласуются с представлениями о происхождении метеоритов из их родительских тел — астероидов и комет. Во второй части лекции кратко рассматриваются вопросы изучения метеоритов, астероидов и комет, имеющие очевидный практический интерес. Представлены сведения о прогрессе в решении проблемы астероидно-кометной опасности, причем сделан акцент на недавних работах российских ученых. Также упомянуты перспективные исследования по разработке методов и средств использования ресурсов малых тел Солнечной системы.

Об определениях

Для начала напомним определения, используемые при рассмотрении различных классов малых тел Солнечной системы. Неопределенность используемых в научной литературе значений границ между некоторыми классами малых тел до сих пор остается довольно большой. Так, согласно официальному определению Международной метеорной организации (ИМО), «метеороид — это твердый объект, движущийся в межпланетном пространстве, размером значительно меньше астероида, но значительно больше атома» (см. <http://www.imo.net/glossary/#letterm>). Еще более расплывчатое определение дано там же понятию «астероид» («один из объектов, размером от менее километра до примерно 1000 км»). Эта расплывчатость понятий иногда приводит к определенным сложностям. В [1] приведен ряд примеров некорректных и сбивающих с толку использования терминов «метеороид», «метеорит», «метеорный поток» и других даже в среде профессионалов.

В значительной степени неопределенность разграничения понятий «астероид» и «метеороид» обусловлена тем, как понятие «астероид» было введено в астрономическую практику. В. Гершель более двух веков назад ввел термин «астероид» (звездообразный) для описания наблюдаемых движущихся небесных объектов, которые выглядели как звезды. То есть любой объект, который отражает достаточно солнечного света, чтобы быть наблюдаемым, и выглядит в телескопе как звезда (т. е. светящаяся точка), но отличается от звезд относительно быстрым перемещением, следует называть

астероидом. Согласно этому исходному определению даже крупный, но ненаблюдавшийся объект нельзя назвать астероидом, и, наоборот, небольшой, но (по счастливой случайности) попавший в поле зрения мощного телескопа космический скиталец классифицируется как астероид. Хороший пример — 3-метровый объект, вошедший в атмосферу Земли 7 октября 2008 г. Объект был обнаружен примерно за сутки до падения и назван астероидом 2008 ТС3. На месте падения были найдены метеориты, т. е. фрагменты исходного тела. Кстати, падение 2008 ТС3 было первым предсказанным падением естественного небесного тела на Землю. А с другой стороны, гораздо более крупное тело (около 17 м), вход которого в атмосферу Земли вызвал знаменитое Челябинское событие 15 февраля 2013 г., не классифицировано как астероид, так как оно вообще не наблюдалось до входа в атмосферу. Это тело можно назвать метеороидом.

Даже разделение малых тел на астероиды и кометы не всегда однозначно. Основное различие между астероидом и кометой состоит в том, что в составе основного тела (ядра) кометы содержатся летучие вещества (льды), которые в процессе приближения к Солнцу испаряются и формируют вокруг ядра газовую или газо-пылевую оболочку — кому. В развитой фазе может также сформироваться хвост или система хвостов. Эти структуры — кома и хвост — отсутствуют у астероида. Однако отличить комету, поверхностная активность у которой после неоднократных сближений с Солнцем закончилась вследствие истощения летучих или образования толстой теплоизолирующей корки тугоплавких веществ, от астероида очень сложно. Один из примеров такой выродившейся (также используют название спящей, скрытой) кометы — сближающийся с Землей астероид (14827) Гипнос [2]. Так что периодические кометы рано или поздно теряют все свои летучие вещества и превращаются в тела, трудноотличимые от астероидов. С другой стороны, ряд тел, всегда считавшихся «нормальными» астероидами, неожиданно проявляют признаки кометной активности. Пример — астероид «Дон Кихот». На протяжении тридцати лет большой околоземный астероид «Дон Кихот» (3552 Don Quixote) был известен астрономам именно как астероид. При помощи телескопа «Спитцер» установлено, что это совсем не астероид, а вполне полноценная комета с комой и еле заметным хвостом [3]. Она проявляет все признаки активности, чего по каким-то непонятным причинам не было заметно на протяжении трех десятков лет. В последнее время большое внимание привлекают т. н. активные астероиды Главного пояса. Активные астероиды (еще

Основные типы малых тел Солнечной системы

Тип малого тела	Размер тела D	Свойства
Пылинка Микрометеороид	Менее 1 мм	Не имеют значения
Метеороид (все необнаруженные тела)	Более 1 мм	Состав как у метеоритов или комет
Астероид	Более 10 м условно	Состав как у метеоритов. Орбиты в основном круговые
Комета	Более 10 м условно	Состав: летучие с включением пыли и камней. Орбиты, как правило, сильно вытянутые

одно название — кометы Главного пояса) имеют орбиты, близкие к круговым, но они проявляют кометоподобную активность, вызванную массовой потерей вещества. Эта потеря может быть вызвана сублимацией, последствиями ударов, быстрого вращения и т. д. [4].

Еще один параметр, отличающий астероиды от комет, — вытянутость орбиты. Орбиты кометного типа, как правило, более эллиптические (вытянутые), иногда со значением эксцентриситета, приближающимся к единице. Орбиты астероидов в массе менее вытянутые. Доля существенно эллиптических орбит (характерных, например, для астероидов, сближающихся с Землей, — АСЗ) невелика, но, поскольку общее число астероидов очень велико, то количество АСЗ в целом существенно превышает количество комет, хотя и здесь выделить «истинные» астероиды и «вымершие» кометы весьма сложно. Согласно [5] примерно 6 % всех объектов, сближающихся с Землей, являются вымершими кометами, которые уже полностью истощили свои запасы летучих веществ.

Мы видим, что классификация малых тел не вполне однозначна. Нужно каждый раз уточнять, что за объект имеется в виду. Но для практических целей подобная «демократия» определений и толкований недопустима. Поэтому мы, имея в виду, что строго установленных стандартов нет, в книге [6] ввели классификацию малых тел Солнечной системы (см. таблицу).

Также напомним, что метеорит — это тело космического происхождения, упавшее на поверхность другого небесного объекта (обычно планеты, спутника планеты, астероида, кометы). С появлением

космических аппаратов микрометеориты могут быть найдены и на этих объектах. В литературе, в том числе в специальных монографиях (например, в книге Е. Л. Кринова «Тунгусский метеорит»), неверно используют этот термин. В случае падения Тунгусского тела нет достоверных доказательств существования твердых остатков (осколков) этого тела. Пока доминирует гипотеза о его полном испарении. Если что-то будет найдено, это и будет Тунгусским метеоритом. В отношении Челябинского тела (до его разрушения в атмосфере) нужно употреблять термин «метеороид» или просто Челябинское тело, а вот найденные и пока не найденные остатки Челябинского тела действительно метеориты. Ксати, болидами и метеорами называются не тела, а явления, сопровождающие высокоскоростные прохождения космического тел (большой и малой массы соответственно) в атмосфере Земли.

Общие сведения о метеоритах

Метеорное тело (метеороид) входит в атмосферу Земли на скорости от 11 до 70 км/с. За счет абляции (обгорания) масса тела значительно уменьшается. В результате из десятков и сотен тонн начальной массы до поверхности Земли может долететь всего несколько килограммов или даже граммов вещества. На Землю ежедневно поступает более 100 т внеземного вещества, в основном в виде пыли. Около 1 % этого количества — крупные обломки (метеориты).

Выделяют падения — это метеориты, прохождение которых через атмосферу Земли наблюдалось (на октябрь 2016 г. зафиксировано 1 151 официально подтвержденных падений), и находки. Находок намного больше. В базе данных The Meteoritical Society по состоянию на 20.01.2017 указаны 55 457 метеоритов с именами, 8 053 с предварительными названиями, 8 457 полнотекстовых отчетов (см. <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>).

Согласно самой общей классификации метеориты делятся на примитивные метеориты, содержание тугоплавких элементов в которых близко к солнечному (например, хондриты), и дифференцированные метеориты. Последние происходят из родительских тел, которые претерпели значительное фракционирование химических элементов. Некоторые из них состоят практически из чистого металла (их называют железными, или, более точно, железоникелевыми метеоритами), другие содержат значительную долю металлического железа (железокаменные метеориты), а могут и вообще не содер-

жать металлов (некоторые ахондриты). Ахондриты и хондриты — это каменные метеориты (рис. 1).

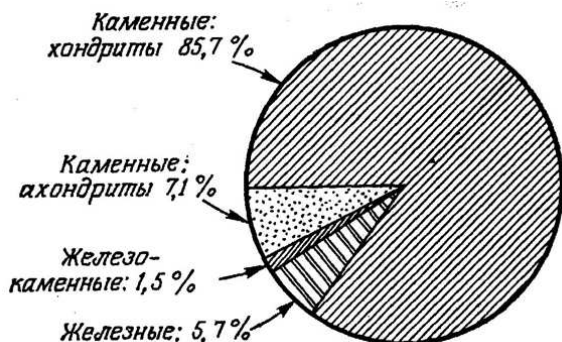


Рис. 1. Статистика хондритов, ахондритов, железных и железокаменных метеоритов среди падений

Так что уже эта общая классификация, основанная на химическом составе метеоритов, отражает предысторию образования метеоритов, да и самой Солнечной системы. Полная классификация метеоритов приведена на рис. 2. В рамках небольшой лекции невозможно подробно описать все многообразие типов метеоритов. Мы остановимся только на наиболее важных с эволюционной точки зрения особенностях.

Хондриты — самые распространенные метеориты. Хондриты разделяют на три больших класса в зависимости от степени окисления содержащегося в них железа: углистые (С), обыкновенные (О) и энстатитовые (Е). В этом порядке в них увеличивается содержание металлического железа и уменьшается окисленного (двух- и трехвалентного) железа.

Обыкновенные хондриты весьма распространены, их около 80 % среди падений. Они состоят из силикатной матрицы, включающей частицы никелистого железа, и сложенные силикатами хондры (зерна миллиметрового и субмиллиметрового размера). Объем хондр от общего — до 80 %). Силикаты представлены главным образом минералами группы оливина $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ и пироксена $(\text{Fe,Mg})\text{SiO}_3$. Содержание элементов (кроме летучих) в них близко к солнечному. В составе хондритов найдены так называемые Са-Al включения (КАВ), возраст которых 4567.3 млн лет, их принимают как нуль-



Рис. 2. Классификация метеоритов

пункт временной шкалы эволюции Солнечной системы. В пределах типа О хондриты классифицируются по содержанию общей массы Fe, которая коррелирует с массой свободного железа. Выделяют подтипы H, L и LL. Доля массы железа в них меняется от 28 до 19 % и свободного железа от 8 до 2 % для подтипов H и LL соответственно.

Помимо химико-минералогических свойств метеоритов, несомненно отражающих историю их образования, важная информация содержится в их петрологических характеристиках, в которых отражается, например, тепловая история вещества метеорита. Так, в каждой группе обыкновенных хондритов отмечается различная степень теплового метаморфизма. В [7] была введена петрологическая схема классификации: H, L и LL группы подразделены на подгруппы — от 3 до 6. На рис. 3 показана текстурная эволюция L хондритов как функция петрологического типа (силикатные текстуры видны в проходящем свете в L3-L6 хондритах). Длительный (млн лет) нагрев хондритов приводит к химическим и текстурным изменениям, прежде всего к развитию ситуации химического равновесия и постепенному исчезновению хондр и матрицы из петрологического типа L3 — малый нагрев до L6 — наибольший нагрев. Теперь даже неспециалисту понятно, что означает тип LL5 Челябинского метеорита.

Углистые (C) хондриты (3.6 % падений) содержат много железа, которое почти все находится в соединениях силикатов. Благодаря

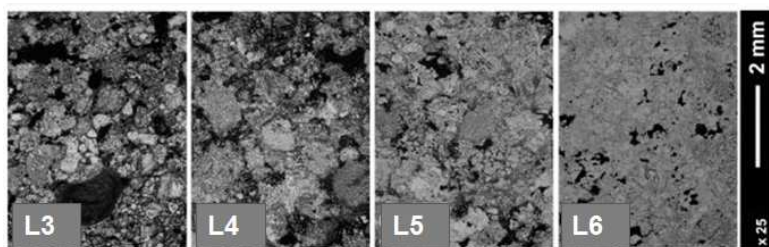


Рис. 3. Степень теплового метаморфизма обыкновенных хондритов типа L

магнетиту (Fe_3O_4), графиту, саже и некоторым органическим соединениям углистые хондриты приобретают темную окраску. Они также содержат значительное количество гидросиликатов (серпентин, хлорит, монтмориллонит и др.). С-хондриты классифицируются по степени изменения их свойств на группы. При обозначении группы к названию класса добавляется буква эталонного метеорита этой группы.

Энстатитовые (E) хондриты (2 % всех хондритов) состоят в основном из свободного железа и силикатных соединений, в которых железо почти отсутствует. Пироксен в метеоритах этого типа содержится в виде энстатита $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$. Е-хондриты, судя по их структурным и минералогическим особенностям, были подвергнуты тепловому метаморфизму при максимальных температурах (600—1000 °C), поэтому в них присутствует меньше всего летучих соединений, а среди других классов хондритов энстатитовые признают самыми восстановленными.

Еще несколько слов о дифференцированных метеоритах. Железные метеориты почти целиком состоят из FeNi — никелистого железа и содержат небольшие количества минералов в виде включений. При высоком содержании Ni (30—50 %) никелистое железо находится в основном в форме тэнита, при низком (6—7 %) в форме камасита, минералов, отличающихся структурой кристаллической решетки. Характерная только для металлических метеоритов внутренняя структура в виде «видманштеттеновых фигур» (проявляются на протравленном распиле) обусловлена очень медленным (в течение миллионов лет) процессом остывания FeNi и фазовыми превращениями в его монокристаллах.

Железокаменные метеориты делятся на два типа, которые отличаются по химическим и структурным свойствам: палласиты и мезосидериты. В палласитах силикаты состоят из кристаллов магнетиального оливина или их обломков, заключенных в сплошной матрице из никелистого железа. В мезосидеритах — смеси из разных силикатов, входящие также в ячейки металла.

В ахондритах хондр нет. По составу и структуре близки к земным базальтам. Все ахондриты в той или иной степени претерпели плавление, которое и уничтожило хондры. Большинство из известных ахондритов относятся к так называемому HED типу и, по мнению многих геохимиков, происходят от астероида Веста. Другие ахондриты происходят с Марса, Луны и других пока не идентифицированных астероидов.

Таким образом, подробная классификация метеоритов отражает важные детали условий их образования и дальнейшей эволюции твердого вещества в Солнечной системе.

Происхождение метеоритов

Метеориты, как они есть, вряд ли могли образоваться напрямую из космической пыли. Сам процесс образования камней (pebbles) пока изучен не до конца. Однако такой процесс шел на самых ранних стадиях эволюции протопланетного диска, когда из газо-пылевой смеси формировались кометы. Существование камней в составе комет вытекает из предположения о том, что именно распавшиеся кометы являются прародителями метеорных потоков. Наблюдения кометы 67P/Чурюмова—Герасименко также подтверждают наличие камешков миллиметрового—сантиметрового размера [8].

Большая часть метеороидов, превратившихся на Земле в метеориты, имела своих «родителей» в виде астероидов, хотя некоторая часть могла иметь в виде «родителей» кометы и другие тела Солнечной системы. Самая общая схема их образования выглядит примерно так, как показано на рис. 4.

Понятно, что дифференцированные метеориты могли образоваться не просто из астероидов, а из астероидов, прошедших глубокое преобразование. Можно выделить следующие этапы:

- коагуляция пыли и рост пылевых сгустков в протопланетных дисках;
- рост планетезималей и образование планет;
- дифференциация в достаточно крупных телах;

- столкновения и разрушение планетезималей;
- транспорт на Землю.

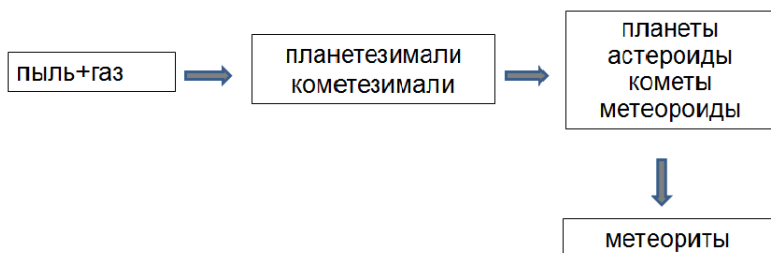


Рис. 4. Схема происхождения метеоритов

Столкновение дифференцированных тел, приводящее к появлению ахондритов, железокаменных и железных метеоритов, проиллюстрировано на рис. 5.

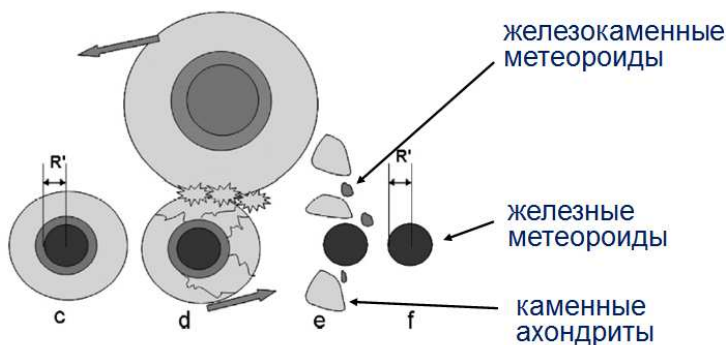


Рис. 5. Схема образования ахондритов, железокаменных и железных метеоритов в результате столкновений крупных тел в Солнечной системе

Список нерешенных проблем в этом чрезвычайно интересном направлении исследований (как принято говорить, на стыке наук — астрономии, геохимии, планетологии) весьма обширен. Здесь можно упомянуть лишь две проблемы: проблему образования хондр и КАВ и проблему соответствия состава астероидов и метеоритов. По-видимому, установлено, что хондры и КАВ образовались из первич-

ных пылевых сгустков (комплексов). Но остаются важные нерешенные вопросы: откуда в холодном протопланетном диске берется такая энергетика, способная обеспечить нагрев вещества до тысячи градусов, и как хондры и КАВ распространялись во всем объеме диска? Вторая проблема состоит в серьезном статистическом расхождении распространенности метеоритов и астероидов сходных классов. Подавляющее большинство объектов в Главном поясе астероидов (ГП) составляют астероиды трех основных классов:

- класс С — их 75 %: альbedo 3—9 %, состав близок к углестым хондритным метеоритам, встречаются во внешней зоне ГП, пример — Гигея;
- класс S — 17 %: альbedo 10—23 %, состав — силикаты Fe, Mg, отсутствие каких-либо углеродных соединений, встречаются во внутренней части ГП, до 2.5 а. е., пример — Юнона;
- класс M — 10 %: альbedo 10—19 %, богаты Ni и Fe, могут быть фрагментами металлических ядер крупных планетезималей, встречаются преимущественно в центральных областях ГП на расстоянии 2.7 а. е. от Солнца, пример — Клеопатра.

Как видно из этой статистики и из рис. 1, относительные количественные оценки астероидов и метеоритов сходных классов заметно отличаются. Общепринятое решение этой проблемы еще не найдено.

Риски, связанные с астероидами, кометами и метеоритами

Метеориты на исторической памяти не причинили человечеству сколь-нибудь значительного ущерба. Но время от времени на Землю падают более крупные тела — астероиды и кометы. Эти события являются источниками угрозы, называемой астероидно-кометной опасностью (АКО). Об этой проблеме написано много. Из недавно изданных русскоязычных работ можно посоветовать коллективную монографию [6]. В России занимаются проблемой АКО на инициативной основе, и, хотя государственная поддержка таких исследований отсутствует, отмечаются некоторые достижения. Именно они кратко представлены в этом разделе.

Обычно практическое решение проблемы АКО разделяют на три основные составляющие:

- а) обнаружение (выявление) всех опасных небесных тел и определение их свойств;
- б) оценка риска и принятие соответствующих решений;

в) выработка мер и средств противодействия и уменьшения ущерба.

Астрономия играет ключевую роль в решении проблем 1 (это чисто астрономическая задача) и 2 (в части оценки вероятности столкновений), а также в решении проблемы 3. При решении каждой из задач важно знать свойства опасных небесных тел (ОНТ). Метеориты, наряду с дистанционными наблюдениями ОНТ, являются важным источником такой информации.

В части наблюдений ОНТ в России наметился определенный прогресс. В ИСЗФ СО РАН появился свой телескоп для обнаружения ОНТ в дальнем космосе. Это проект крупного (1.6 м) широкоугольного (2.8°) обзорного телескопа АЗТ-33ВМ. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые снимки, выполненные на этом перспективном инструменте, показаны на рис. 6. Телескоп по своим возможностям сравним со знаменитым инструментом PanSTARRS. К сожалению, не обошлось без трудностей. Телескоп введен в опытную эксплуатацию в декабре 2015 г., но до сих пор не может заработать в полную силу из-за отсутствия средств на современный широкопанорамный приемник излучения.

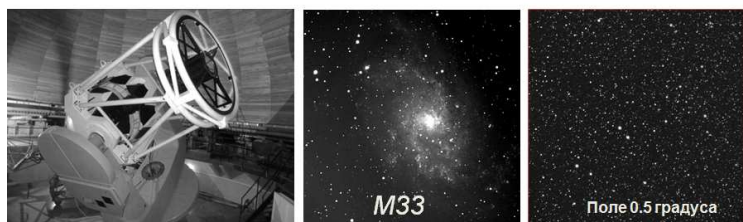


Рис. 6. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые снимки, выполненные на нем

Проблема обнаружения ОНТ стоит по-прежнему остро. На рис. 7 проиллюстрирована полнота наших сведений об ОНТ. Конкретная информация приведена для АСЗ, т. е. для астероидов с перигелийным расстоянием, не превышающим 1.3 а. е. Более 98 % открытых ОНТ производится средствами США. Российские ученые и специалисты участвуют в международной кооперации по обнаружению ОНТ. К сожалению, вклад наших наземных средств, обсерваторий и сетей ISON и МАСТЕР, пока весьма скромнен. По-прежнему мы ожидаем, что государство окажет поддержку.

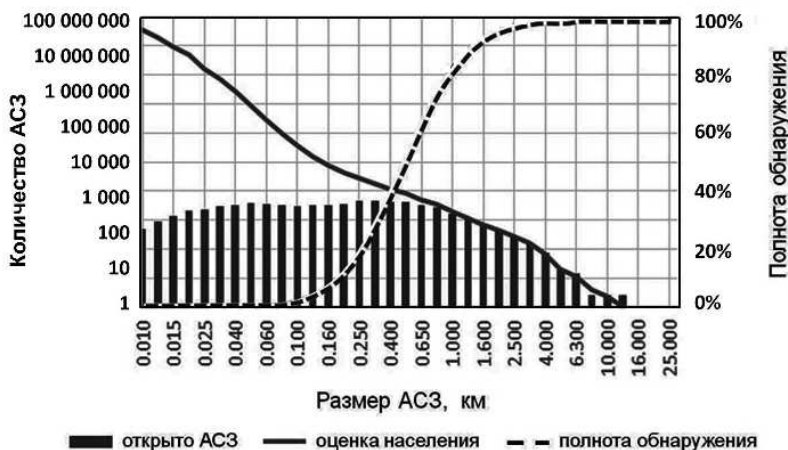


Рис. 7. Полнота обнаружения АСЗ (штриховая линия) и прогнозируемое распределение популяции АСЗ по размерам (сплошная линия). Темными столбцами показано количество известных на 1 января 2015 г. АСЗ в интервале размеров (данные предоставлены R. Landis, NASA)

Современная (с учетом опыта Челябинского события 15 февраля 2013 г.) трактовка противодействия угрозе АКО включает задачу обнаружения не только крупных (более 100 м), но также и относительно малых ОНТ (декаметровых) тел. Особенно остро стоит проблема с обнаружением опасных небесных тел, приходящих с дневного неба. Такая задача для своего решения требует выведения телескопов в космос. В [9] предложен вариант создания системы обнаружения околоземных ОНТ. В результате проработки аван-проекта СОДА (Система обнаружения дневных астероидов) удалось разработать экономичные варианты (реализации) такой системы. Космическая система состоит из одного или двух КА, помещаемых в окрестность точки L1 (в системе Земля—Солнце) на расстоянии около 1.5 млн км от Земли. Телескоп, находящийся в окрестности точки L1, будет видеть ОНТ, летящие к Земле от Солнца, при благоприятных для наблюдений значениях фазового угла. Показано, что задача обнаружения декаметровых ОНТ, летящих со стороны Солнца, может быть реше-

на с помощью относительно небольшого телескопа апертурой ~ 0.3 м. На рис. 8 приведена схема работы обсерватории СОДА. Главный режим работы — создание конусного барьера(ов) с помощью одного или нескольких телескопов. ОНТ наблюдается при пересечении барьера(ов) с тем чтобы за 3–4 ч до возможного столкновения (при скорости сближения 20 км/с), т. е. на расстоянии ~ 250 тыс. км от Земли, орбита ОНТ и место возможного столкновения были определены с заданной точностью. На рис. 8 показано два конических барьера, но их может быть больше.

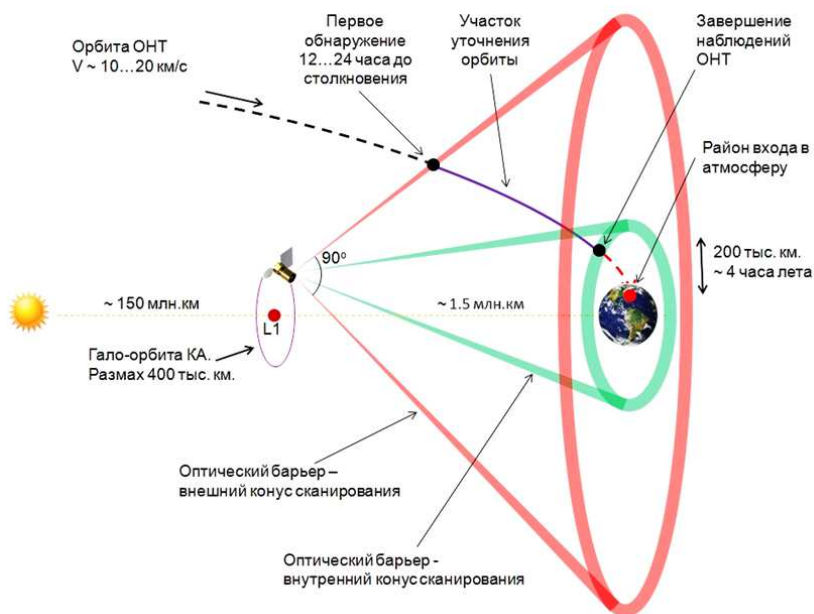


Рис. 8. Принципиальная схема работы космического аппарата СОДА

Российские ученые принимают активное участие в разработке надежных способов оценки рисков. В работе [10] детально рассчитаны последствия падения 300-метрового тела на Землю. Некоторые выводы на первый взгляд кажутся парадоксальными. Например, на рис. 9 показаны распределения максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м

под различными углами к поверхности. Как видно из рисунка, при вертикальном ударе область избыточного давления намного меньше, чем при косом ударе.

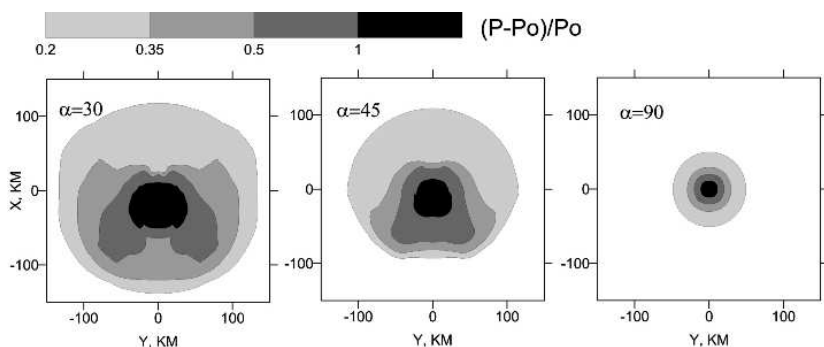


Рис. 9. Распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м под разными углами к поверхности. В случае косого удара астероид движется сверху (из области $X > 0$) вниз и в точке $X = 0$, $Y = 0$ касается поверхности

Малые тела Солнечной системы — будущий ресурс человечества

Метеориты дают некоторые представления о возможной ценности астероидов и комет как естественных природных ресурсов. Уже более 30 лет астероиды вполне серьезно рассматриваются как значительный потенциальный ресурс сырья для человечества (см. [11]). Многие АСЗ относительно легкодостижимы с точки зрения затрат энергии. Астероиды имеют очень низкую гравитацию на поверхности, что облегчает транспортировку сырья с них. Кроме того, природа уже выполнила значительную переработку (обогащение) вещества таких тел для нас. Например, металлические астероиды содержат золота и платины около ста частей на миллион. Элементы группы платиноидов настолько ценны для нас (не из-за ювелирной стоимости, а, например, в качестве промышленных катализаторов), что, возможно, в будущем станет выгодно «импортировать» их из космоса. При сегодняшних ценах на эти элементы один маленький

металлический астероид около 200 м в диаметре может стоить много миллиардов долларов. Астероиды класса С относительно богаты летучими, что может иметь большое значение для будущего. Например, можно будет наладить обеспечение водой прямо в космосе. Вода и солнечная энергия — основа производства водорода и кислорода — элементов ракетного топлива для будущих космических миссий.

Вполне серьезные исследования по выбору коммерчески интересных объектов, разработке методов транспортировки добывающего оборудования на астероиды и ценных материалов с астероидов на Землю и многих других аспектов космодобычи начаты в ряде частных компаний (в некоторых случаях с государственной поддержкой). В апреле 2012 г. компания Planetary Resources впервые в истории объявила о планах добычи на астероидах металлов платиновой группы, а также воды для систем жизнеобеспечения и получения водородно-кислородного ракетного топлива. Еще одна американская компания, Energy and Space Engineering LLC, в настоящее время активно занимается разработкой коммерческой миссии к астероиду, богатому ресурсами, для транспортировки его на низкую околоземную орбиту. Компания Deep Space Industries объявила, что намерена запустить целую группу (флот) беспилотных кораблей, которые смогут перехватывать небольшие астероиды и, возможно, смогут найти такие металлы, как платина. Гонка за космическими ресурсами началась.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 17-12-01441.

Библиографические ссылки

1. Beech M., Steel D. On the definition of the term *meteoroid* // Q. J. R. Astron. Soc. — 1995. — Vol. 36. — P. 281–284.
2. Whitman K., Morbidelli A., Jedicke R. The size frequency distribution of dormant Jupiter family comets // Icarus. — 2006. — Vol. 183. — P. 101–114. [astro-ph/0603106](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.03.006).
3. Mommert M., Hora J., Farnocchia D. et al. Spitzer observations of two mission-accessible, tiny asteroids // Asteroids, Comets, Meteors 2014 / ed. by K. Muinonen, A. Penttilä, M. Granvik et al. — 2014.
4. Jewitt D. The Active Asteroids // Astron. J. — 2012. — Vol. 143. — P. 66. 1112.5220.
5. Morbidelli A., Bottke W. F., Jr., Froeschlé C., Michel P. Origin and Evolution of Near-Earth Objects // Asteroids III / ed. by W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — 2002. — P. 409–422.

6. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия, ред. В. А. Пучков. — М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.
7. *Van Schmus W. R., Wood J. A.* A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* — 1967. — Vol. 31. — P. 747.
8. *Bauer J. M., Kramer E., Mainzer A. K. et al.* WISE/NEOWISE Preliminary Analysis and Highlights of the 67p/Churyumov-Gerasimenko near Nucleus Environs // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 758. — P. 18.
9. *Шустов Б. М., Шугаров А. С., Нароенков С. А., Прохоров М. Е.* Астрономические аспекты космических угроз: новые задачи и подходы к проблеме астероидно-кометной опасности после Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрон. журн.* — 2015. — Т. 92. — С. 867—880.
10. *Shuvalov V. V., Svetsov V. V., Artem'eva N. A. et al.* Asteroid Apophis: Evaluating the impact hazards of such bodies // *Solar System Research.* — 2017. — Vol. 51. — P. 44—58.
11. *Asteroids. Prospective Energy and Material Resources*, ed. by V. Badescu. — М. : Springer-Verlag, 2013.